

大别山超高压变质岩的冷却史及折返机制*

李曙光 李秋立 侯振辉 杨蔚 王莹

LI ShuGuang, LI QiuLi, HOU ZhenHui, YANG Wei and WANG Ying

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2005-05-10 收稿, 2005-07-05 改回.

Li SG, Li QL, Hou ZH, Yang W and Wang Y. 2005. Cooling history and exhumation mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie mountains, central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4):1117-1124

Abstract A T-t cooling path for UHPM rocks and their country rock from Dabie mountains reveals that the cooling history of the UHPM rocks from 800°C to 300°C can be subdivided into three stages: two rapid cooling stages (the initial rapid cooling from 800°C to 500°C during 226 ± 3Ma to 219 ± 7Ma and the second rapid cooling from 450°C to 300°C during 180Ma to 170Ma) and one isothermal stage in between them (Li S. *et al.*, 2000). This T-t path with two rapid cooling processes has been confirmed by the recent geochronological results including a precise U-Pb age of 218 ± 1.2Ma (with $T_c = 460^\circ\text{C}$) for rutile from the coesite-bearing eclogite (Li Q. *et al.*, 2003), the Th-Pb monazite core age of 223 ± 1 Ma (with $T_c = 675 \pm 25^\circ\text{C}$) and monazite rim age of 209 ± 3Ma (corresponding to retrograde amphibolite facies metamorphism $T_m = 500^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$) for the jadeite quartzite (Ayers *et al.*, 2000) and Rb-Sr age of 182.7 ± 3.6Ma for the secondary phengite from an intensive foliated eclogite (Li S. *et al.*, 2001). The two rapid cooling events may reflect two rapid uplift processes of the UHPM rocks during the exhumation history. The U-Pb zircon ages of 225 ~ 205Ma for the syncollisional granites developed in eastern Qinling and eastern Sulu terrane coincide with the first rapid cooling time of the Dabie UHPM rocks. Because syncollisional granite is suggested to be result of slab break off during continental subduction (Davies and Blanckenburg, 1995), the time consistency between the syncollisional granite formation and the first rapid cooling of the UHPM rocks indicates that the slab break off could be one of the important mechanisms for the initial uplifting and cooling of the UHPM rocks. The Pb isotopic mapping in Dabie mountains reveals that the UHPM rocks characterized by relative higher radiogenic Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.026 \sim 20.781$) in South Dabie zone were derived from subducted upper continental crust, while the UHPM rocks characterized by relative lower radiogenic Pb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.844 \sim 17.204$) in North Dabie zone were derived from subducted lower continental crust. This observation indicates that a detachment or a decoupling in between the subducted upper and lower continental crusts must be occurred during continental subduction. It has been demonstrated by a physical modeling that the decoupled upper crust can be uplifted by thrust along the detachment surface during the continental subduction process. Similarly, it can be referred that a detachment or a decoupling in between the felsic and mafic subducted lower continental crust could be also occurred, because no subducted mafic lower continental crust has been exhumed in Dabie orogen. Several low-viscosity zones occurred at different depths in continental lithosphere (Meissner and Mooney, 1998) provide the conditions for such detachment or decoupling in subducted continental crust. Therefore, the first rapid uplifting of the subducted upper crust and/or part of felsic lower crust is a result of the both detachment or decoupling in subducted continental crust and slab breakoff. These processes can only cause the uplifting and exhumation of the decoupled upper and felsic lower continental crust, while the undecoupled mafic lower continental crust could be subducted continuously after slab breakoff. After slab breakoff, the continuing convergence of two continental blocks in the later Triassic and earlier-middle Jurassic might induce the lithosphere splitting of the SCB and lithospheric-wedging between the south margin of the NCB and north margin of the SCB. This process caused the overthrust of the mid-upper continental crust with exhumed UHPM rocks and underthrust of the deep lithosphere of the SCB. It could be an important mechanism responsible for the second rapid cooling and uplifting of the UHPM rocks. The Rb-Sr age of 182.7 ± 3.6Ma for the secondary phengite from an intensive foliated eclogite may

* 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999075503)和国家自然科学基金(批准号:40373009, 40173014)资助。

第一作者简介: 李曙光, 男, 1931年生, 教授, 中国科学院院士, 主要从事同位素年代学、地球化学及痕量元素地球化学教学与研究, E-mail: lsg@ustc.edu.cn

indicates the lithospheric-wedging time. Geochronology study of the Huilanshan mafic granulite from the Luotian Dome reveal a fast uplifting in the early Cretaceous. An intense magmatism was occurred simultaneously in the Dabie orogen. The coupling of the mountain fast uplifting and intense magmatism in the Dabie orogen suggests that a mountain root remove or lithospheric delamination event was occurred in the early Cretaceous. Consequently, the UHPM rocks in the Dabie orogen must be further exhumed in a large area with this fast mountain uplifting.

Key words UHPM rocks; cooling history; exhumation mechanism; Dabie orogen

摘要 大别山超高压变质岩及其围岩 T-t 冷却曲线显示了超高压变质岩的冷却史从 800℃ 到 300℃ 经历了三个阶段:两次快速冷却(226 ± 3Ma 到 219 ± 7Ma 期间从 800℃ 到 500℃ 的第一次快速冷却,180 ~ 170Ma 期间从 450℃ 到 300℃ 的第二次快速冷却)和介于二者之间的等温过程。这一具有两次快速冷却的 T-t 曲线已被近年来获得的高精度金红石 U-Pb 年龄(218 ± 1.2Ma)(Li *et al.*, 2003), 高压变质和退变质独居石 Th-Pb 年龄(Ayers *et al.*, 2002), 和强面理化榴辉岩二次多硅白云母的 Rb-Sr 年龄(182.7 ± 3.6Ma)(Li *et al.*, 2001) 所证实。超高压变质岩的二次快速冷却事件反映了二次快速抬升过程。在东秦岭及苏鲁地体东端发育的同碰撞花岗岩 U-Pb 年龄为 225 ~ 205Ma, 与超高压变质岩第一次快速冷却时代吻合。考虑到同碰撞花岗岩与俯冲板片断离的成因联系, 这种时代耦合关系表明俯冲板片断离可能是超高压变质岩第一次快速抬升和冷却的重要机制之一。大别山 Pb 同位素填图揭示出南大别带超高压变质岩具有高放射成因 Pb 特征, 因而源于俯冲的上地壳; 而北大别带超高压变质岩具有低放射成因 Pb 特征, 源于俯冲长英质下地壳。这表明在陆壳俯冲过程中上、下地壳之间可发生挤离(detachment)或脱耦(decoupling)。已有实验证明脱耦的上地壳在俯冲过程中可沿挤离面逆冲抬升(Chemenda *et al.*, 1995)。同理, 由于俯冲镁铁质地壳在大别山没有出露, 可以推测俯冲长英质地壳和镁铁质地壳之间也最终发生了挤离或脱耦。大陆岩石圈在不同深度存在若干低粘度带(Meissner and Mooney, 1998) 是上述俯冲陆壳分层脱耦现象发生的依据。因此, 俯冲上地壳及部分长英质地壳的第一次快速抬升折返是俯冲过程中大陆地壳内部分层脱耦和俯冲板片断离的综合结果。上述过程只能使已脱耦的上地壳及部分长英质地壳抬升折返, 而未与俯冲岩石圈脱耦的下地壳在板片断离后仍可继续俯冲。俯冲板片断离后, 两大陆块在晚三叠世和早-中侏罗世继续汇聚, 导致华南陆块下地壳继续俯冲, 及已经脱耦并折返至中上地壳的超高压岩片向北仰冲。这一仰冲可能是导致超高压变质岩第二次快速抬升的重要机制。强面理化榴辉岩二次多硅白云母的 Rb-Sr 年龄(182.7 ± 3.6Ma) 可能记录了这一超高压岩片仰冲事件发生的时代。惠兰山基性麻粒岩年代学研究揭示了罗田穹隆在早白垩世的快速抬升, 与此同时大别山发生了大规模岩浆事件。山体快速抬升与大规模岩浆事件的耦合关系指示了大别造山带早白垩世的去根作用, 或岩石圈拆离事件。伴随这一山体快速抬升, 大别山超高压变质岩开始大面积出露地表。

关键词 超高压变质岩; 冷却史; 折返机制; 大别造山带

中图法分类号 P588.348

1 前言

在陆-陆碰撞过程中, 先期俯冲洋壳的拖曳作用, 及导致陆块汇聚的地幔驱动力可导致一个陆块的岩石圈向另一陆块岩石圈下面俯冲到地幔深度。这一陆壳深俯冲作用已被陆壳岩石中所发现的柯石英和金刚石等超高压变质矿物所证实(Chopin, 1984; Smith, 1984; Wang *et al.*, 1989; Okay *et al.*, 1989; Soblev and shatsky, 1990; Xu *et al.*, 1992) 这种含柯石英和金刚石包裹体的造山带变质岩我们称为超高压变质岩(它包括榴辉岩, 硬玉石英岩及超高压片麻岩等), 它们是陆壳岩石在俯冲到 > 100km 深度时, 在高温(T ≈ 700 ~ 900℃), 高压(P ≥ 27kbar) 下变质形成的。超高压变质岩形成于 100km 以上的深度, 但今天已出露于地表, 且柯石英这种超高压矿物相被保留下来。这说明它们一定经历了快速的抬升折返过程。查明超高压变质岩快速折返地表的构造机制一直是大陆深俯冲研究中最重要科学问题之一。在精确的测定超高压变质岩各种变质年龄和冷却年龄基础上

构建的 T-t 冷却曲线可指示超高压变质岩的抬升冷却历史。造山带不同超高压岩片的同位素填图和精确年代学研究, 同碰撞及碰撞后岩浆岩年代学和碰撞后山体抬升速率的测定, 可以为揭示超高压变质岩的快速抬升机制提供重要制约。近 5 年来, 我们围绕这一科学问题做了较深入的化学地球动力学探讨。已有研究表明大陆岩石圈流变学性质的不均一性导致大陆岩石圈在俯冲过程中会发生与大洋岩石圈俯冲不同的构造运动。本文将对这方面的工作做一总结和讨论。

2 超高压变质岩的冷却史

应用同位素年代学原理, 通过对各种超高压变质及退变质矿物进行精确定年, 我们可以测定出超高压变质岩折返过程的冷却 T(温度)-t(时间) 曲线, 从而揭示其抬升过程。Li *et al.* (2000) 通过对大别山超高压变质岩的热年代学研究已揭示出它们从峰期变质温度 800℃ 到 300℃ 经历了两次快速冷却过程: 即 226Ma ~ 219Ma 期间经历了从 800℃ 到 500℃ 的第一次快速冷却(40℃/Ma); 在 219Ma ~ 180Ma 期间为一

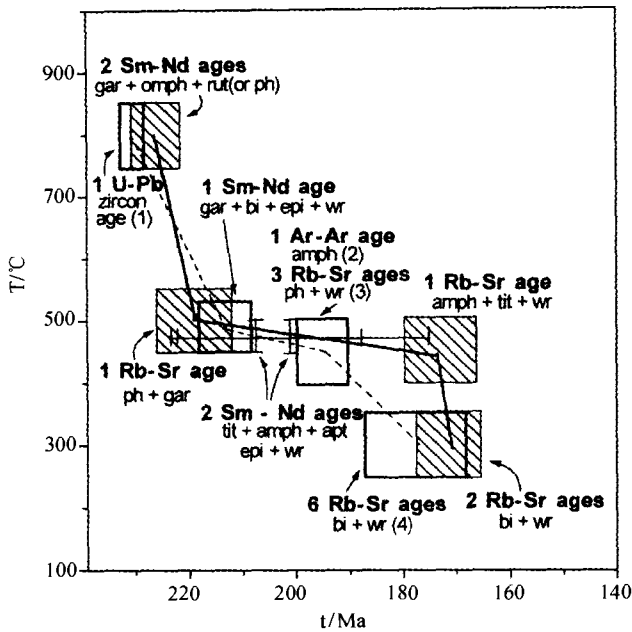


图1 大别山双河超高压变质岩及其围岩的冷却 T-t 曲线 (据 Li *et al.*, 2000)

Fig. 1 Cooling T-t path of UHPM rocks and their country rocks at Shuanghe, Dabie Mountains (after Li *et al.*, 2000).

温度在 500°C 到 450°C 范围内的近等温阶段,并对应一个退变质角闪岩相重结晶过程;而后在 180Ma 到 170Ma 又经历了从 450°C 到 300°C 的第二次快速冷却阶段(15°C/Ma)(图 1)。

为了验证这样一条包含两次快速冷却阶段的 T-t 曲线,近年来我们精确测定了大别山含柯石英榴辉岩中金红石的 U-Pb 年龄(218 ± 1.2Ma)(Li *et al.*, 2003)。这是世界上第一个精确测定的榴辉岩金红石 U-Pb 年龄,其对应的封闭温度 $T_c = 460^\circ\text{C}$ 。这一年龄支持上述第一次快速冷却事件在 219Ma 冷却到 500°C 的结论。此外,我们还获得了一系列强面理化榴辉岩沿面理发育的二次多硅白云母 Rb-Sr 年龄(182.7 ± 3.6Ma ~ 187 ± 3.7Ma)(李曙光等,2000;李秋立,2003 博士论文)。根据石榴石中脆性劈理与面理的关系,已有研究指出,这种面理是在角闪岩相条件下由挤压剪切构造形成的(徐树桐等,1999)。这一沿面理发育的二次多硅白云母 Rb-Sr 年龄(平均值 185 ± 2Ma)和对应的变质温度(450°C)均与上述第二次快速冷却事件相吻合,因此它是超高压变质岩第二次快速抬升的构造记录。此外,Ayers *et al.* (2002)报导了独居石 Th-Pb 年龄,其核部年龄(223 ± 1Ma)指示高压变质独居石冷却到 650 ~ 700°C 的时代;其退变质增生边年龄(209 ± 3Ma)指示角闪岩相退变质重结晶时代。这些结果均进一步支持了 Li *et al.* (2000)测定的大别山超高压变质岩二次快速冷却曲线。综合这些新的年龄数据,可获得一条更为精确的大别山超高压变质岩冷却曲线(图 2)。

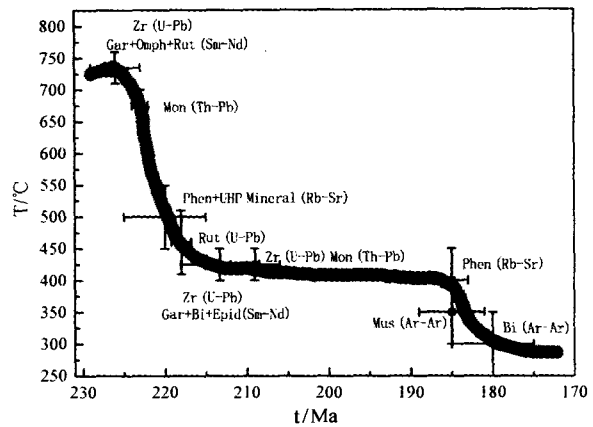


图2 改进的大别山超高压变质岩冷却 T-t 曲线(据李秋立 2003 博士论文)

Fig. 2 Improved Cooling T-t path of UHPM rocks from the Dabie mountains (after Li Q., PhD thesis, 2003).

3 超高压变质岩的折返机制

3.1 第一次快速抬升的机制

Davies and Blanckenburg(1995)提出俯冲板片断离(slab break off)是导致超高压岩片在浮力作用下快速抬升折返的主要机制,与此同时,由于断离俯冲板片对上地幔的扰动作用可诱发同碰撞岩浆作用。因此,查明秦岭-大别造山带同碰撞花岗岩形成时代,并与超高压变质岩二次快速冷却事件的发生时代进行对比,可以帮助我们判断俯冲板片断离是否是导致大别山超高压变质岩抬升折返的主要构造机制,以及它应对哪一次快速抬升事件负责。我们对东秦岭 6 个同碰撞花岗岩侵入体,进行了系统的同位素年代学研究,获得的锆石 U-Pb 年龄为 205 ~ 220Ma (Sun *et al.*, 2002)。Chen *et al.* (2003)对苏鲁地体东部 3 个同碰撞花岗岩的锆石 U-Pb 定年也获得了 205 ~ 225Ma 的年龄。这些年龄与大别山超高压变质岩第一次快速冷却事件的结束时代一致。这种一致性表明大别山超高压变质岩的第一次快速抬升与俯冲板片断离有关,它使俯冲陆壳失去俯冲大洋板片(榴辉岩相)的下拖力而在浮力作用下迅速反弹(Davies and Blanckenburg, 1995)。

然而,俯冲板片断离是否是导致超高压变质岩第一次快速抬升的唯一机制,以及是否所有的超高压变质岩都要在俯冲板片断离后才开始折返则是需要进一步查清的问题。此外,俯冲陆壳在俯冲板片断离后是整体反弹抬升,从而使俯冲陆壳整体收缩回去(Wang and Liou, 1991),大陆深俯冲作用停止,还是这种浮力仅使部分俯冲陆壳(超高压岩片)快速抬升,而大陆深部岩石圈仍继续进行俯冲,是另一个令人感兴趣的问题。这个问题涉及到大陆岩石圈在深俯冲过程中是像大洋板块一样保持统一刚性板块,还是由于大陆

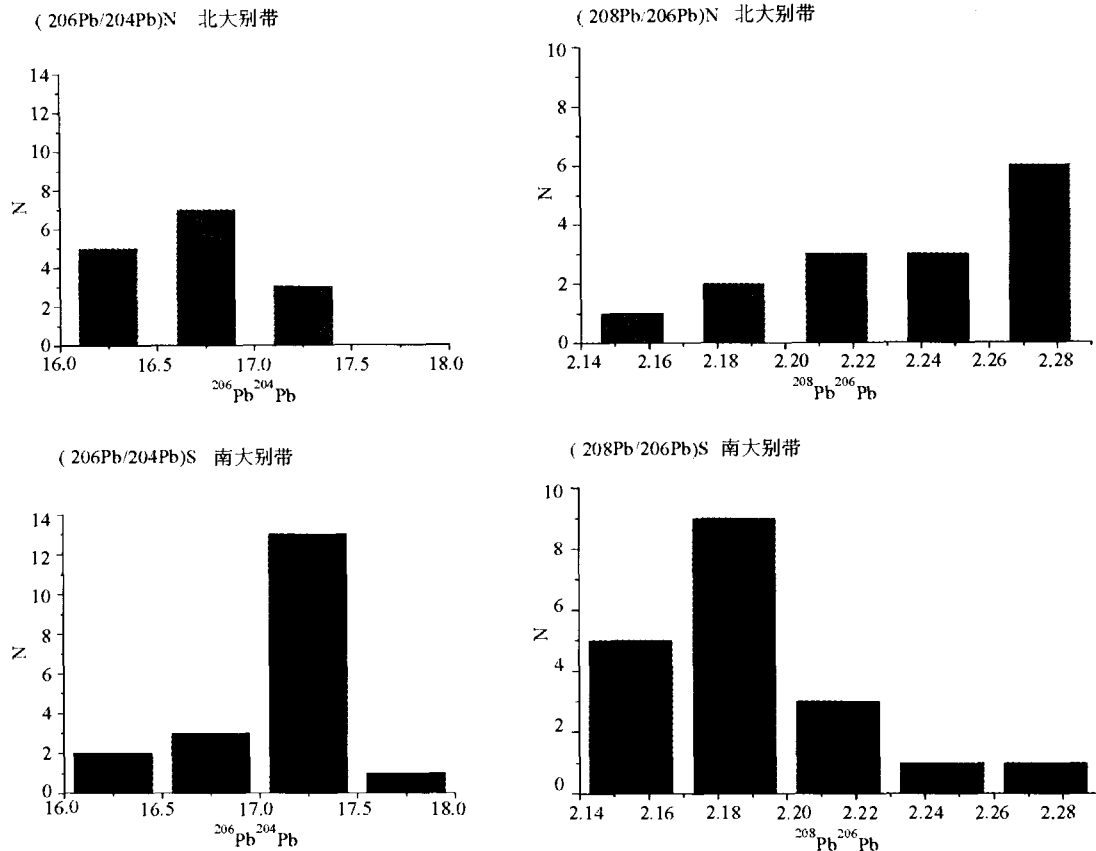


图3 大别山北大别高压变质带和南大别超高压变质带正片麻岩长石普通 Pb 同位素组成统计直方图(据李曙光等未发表数据)。

Fig. 3 The statistical distributions of the feldspar common Pb isotope compositions of the orthogneisses from the north Dabie HP and south Dabie UHP metamorphic zones (unpublished data of Li S. G. . *et al.*)

岩石圈流变学性质的不均一性而发生层间挤离 (detachment) 或脱耦 (decoupling)。从而具有与大洋板块俯冲不同的构造运动特征。

大别山超高压变质带可划分为两个一级岩片,它们是靠近地缝合线的北大别高压变质带(岩石不含柯石英),和岩石富含柯石英的南大别超高压变质带,它们以五河-水吼韧性剪切带分隔。全岩 Pb 同位素填图表明,北大别变质岩含放射成因 Pb 较低($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.844 \sim 17.204$),具有下地壳特征;而南大别超高压变质岩含放射成因 Pb 较高($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.026 \sim 20.781$),具有上地壳特征(李曙光等,2001a; 张宏飞等,2001)。然而这种全岩 Pb 同位素填图工作有两个缺点:(1)地表采的全岩样品的 U/Pb, 和 Th/Pb 比值可能因地表风化作用而发生分异,造成经年龄校正获得的初始 Pb 同位素值有较大偏差;(2)采自南大别超高压变质带的样品含有较多的表壳岩,而采自北大别高压变质带的样品基本都是深源的正片麻岩,二者原岩差异大,不好比较。为了克服这些缺点,检验全岩 Pb 同位素填图所获得的结论是否成立,近年来我们又开展了大别山片麻岩长石普通 Pb 填图研究。假设在超高压变质条件下,长石的 Pb 同位素组

成与全岩重新平衡,则该长石普通 Pb 可代表全岩超高压变质前的初始 Pb 同位素组成。所采集的 34 个片麻岩样品(北大别带 15 个,南大别带 19 个)均是原岩为晚元古代(7~8 亿年)中酸性岩浆岩的正片麻岩。由于它们原岩的形成时代和成因相同,如果它们原岩的 Pb 同位素组成没有显著差异,则南、北大别带正片麻岩俯冲前的 Pb 同位素差异是由于其原岩 U/Pb 比值差异造成的。这些正片麻岩长石普通 Pb 测定结果如图 3 所示。图 3 显示南大别带(S)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 中心值大于北大别带(N),说明南大别带正片麻岩的 U/Pb 比值高于北大别;南大别带(S)的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 中心值小于北大别带(N),说明南大别带正片麻岩的 Th/U 比值小于北大别。这些普通 Pb 分布特征说明南大别带正片麻岩具有上地壳特征,而北大别带正片麻岩具有下地壳特征,因为上地壳较下地壳有较高的 U 含量。它验证了全岩 Pb 同位素填图所获得的基本结论是正确的。

根据 Pb 同位素填图工作,我们指出大别山华南陆块深俯冲的上地壳岩石与下地壳岩石之间可能发生挤离 (detachment),并形成一主逆断层,它使深俯冲的上地壳岩片向南仰冲到浅部(图 4A)(李曙光等,2001a)。这一上、下地

壳之间的挤离或脱耦与上地壳下部的低粘度性质有关 (Meissner and Mooney, 1998)。此后, 由于早白垩纪大别山的穹隆构造使北大别带 (位于穹隆核心) 抬升幅度大于南大别超高压带, 从而使北大别带折返的俯冲上地壳岩片被剥蚀掉而出露俯冲下地壳岩石 (图 4B)。以大陆岩石圈下地壳具有低粘度性质为假设前提的构造模拟实验已证明, 在陆壳俯冲过程中在下地壳低粘度带形成大的挤离面和逆断层, 从而导致俯冲到地幔深度的上地壳岩片逆冲折返到浅部 (Chemenda *et al.*, 1995)。需要指出的是这一过程可以发生在俯冲板片断离以前的陆壳俯冲过程中。因此在俯冲板片发生断离以前, 脱耦的俯冲上地壳已开始抬升折返, 俯冲板片断离只是进一步加速了这一抬升折返过程。事实上北大别超高压变质带岩石以中性的闪长质片麻岩为主, 基性的榴辉岩较少, 因此它仍属于下地壳上部的岩石。这部分岩石由于平均比重较小可以获得上浮推力, 而俯冲的最下部地壳 (lowermost crust) 镁铁质榴辉岩层因其高密度而不能获得上浮力。因此可以推测, 在俯冲下地壳的上部层位与下部层位之间很可能发育另一大的挤离面和逆断层, 它使俯冲下地壳的上部岩片 (如北大别带) 逆冲上升而出露地表, 而下部地壳 (包含镁铁质岩层) 继续随大陆岩石圈地幔俯冲, 直到陆块的汇聚碰撞过程停止。Meissner and Mooney (1998) 指出, 下地壳内部也存在低粘度带, 这为下地壳内部发生挤离或脱耦提供了条件。

小结: 由于大陆地壳内部流变学性质的不均匀性和存在若干低粘度带, 在陆壳俯冲过程中上、下地壳之间, 以及下地壳内部可发生挤离 (detachment) 或脱耦 (decoupling)。与俯冲岩石圈脱耦的上地壳及其它岩片在俯冲过程中可沿挤离面逆冲抬升。俯冲板片断离使俯冲大陆岩石圈突然失去了俯冲洋壳的下拖力而减速, 它可使减速的俯冲岩石圈对已脱耦岩片的向下拖拽力减弱, 从而使已脱耦岩片获得的向上净浮力增加并导致其抬升过程加速。因此, 大别山超高压变质岩的第一次快速抬升和冷却事件是陆壳俯冲时的壳内挤离及逆冲构造和俯冲板片断离导致的超高压变质岩片净上浮力增加的综合效果。在上述过程中, 只有与俯冲岩石圈脱耦的上地壳及部分长英质下地壳折返抬升, 而未与俯冲岩石圈脱耦的下部地壳将不会抬升折返。如果在板片断离后华北和华南陆块的会聚过程仍不停止, 与喜马拉雅碰撞带类比, 可以推测这部分未脱耦的下地壳将有可能与华南陆块岩石圈地幔一起在无俯冲洋壳牵引的情况下进行平俯冲 (flat subduction), 并构造板底垫托于华北岩石圈之下。

3.2 第二次快速抬升的机制

超高压变质岩的第二次快速冷却过程指示其相关构造抬升事件应发生在 180Ma 左右。各种地质现象表明, 侏罗纪大别山仍处在挤压构造体制中 (周进高等, 1999)。古地磁研究表明, 直到晚侏罗纪华北和华南陆块的极移轨迹才拼合在一起 (Lin *et al.*, 1985; Yang *et al.*, 1991), 这说明在俯冲板

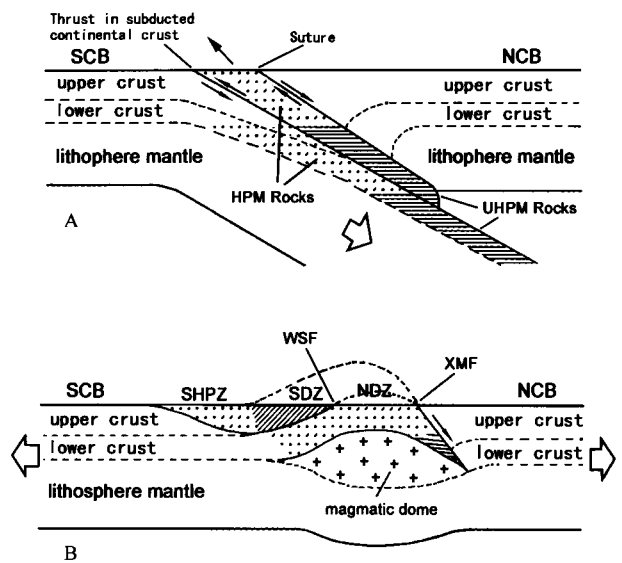


图 4 A 大陆深俯冲过程中俯冲上地壳与下地壳之间发生挤离并产生逆断层, 使俯冲上地壳岩片逆冲至浅部; B 早白垩纪穹隆构造使北大别带 (NDZ) 大幅度抬升并被强烈剥蚀从而使俯冲下地壳岩石出露地表 (据 Li *et al.*, 2003)

Fig. 4 A. the detachment and a thrust between subducted upper and lower continental crust was occurred during the continental subduction, which causes the uplift of the upper crust slab; B. the Northern Dabie Zone (NDZ) was intensively uplift and eroded by the early Cretaceous doming, which result in the exhumation of the lower subducted crust in the NDZ. (after Li *et al.*, 2003)

片断离之后华北和扬子两大陆块的汇聚过程并未停止, 并一直持续到晚侏罗纪。在俯冲板片断离以后, 两大陆块继续汇聚过程中, 究竟发生了什么构造事件导致了大别山超高压变质岩第二次快速抬升是一个重要而令人感兴趣的问题。Li Z. -X. (1994) 根据中国东部的航磁数据, 提出郟庐断裂以东, 华北与华南陆块深部地缝合线应位于南京以东一线, 它较地表地缝合线南移了 400km。Chung (1999) 对苏北新生代玄武岩的地球化学研究也指出苏北陆下岩石圈地幔是华北型的, 支持了郟庐断裂以东深部地缝合线南移的观点。李曙光, 杨蔚 (2002) 通过对比中国东部华北和华南陆块以及大别山的中生代镁铁质岩岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成发现, 在郟庐断裂以西大别山地区深部岩石圈的同位素组成与华北类似, 据此得出大别山也存在深部岩石圈地缝合线较地表地缝合线南移现象。这三位作者对这一深部地缝合线的共同解释就是在侏罗纪, 在两大陆块继续汇聚的动力作用下, 华南陆块北缘岩石圈发生劈裂, 华北岩石圈楔入华南岩石圈造成的 (图 5)。根据这一构造模型, 华南陆块北缘的陆壳 (包括已折返至地壳水平的超高压岩石) 向北仰冲到华北岩石圈之上, 从而导致了大别山超高压变质岩的第二次快速抬升。

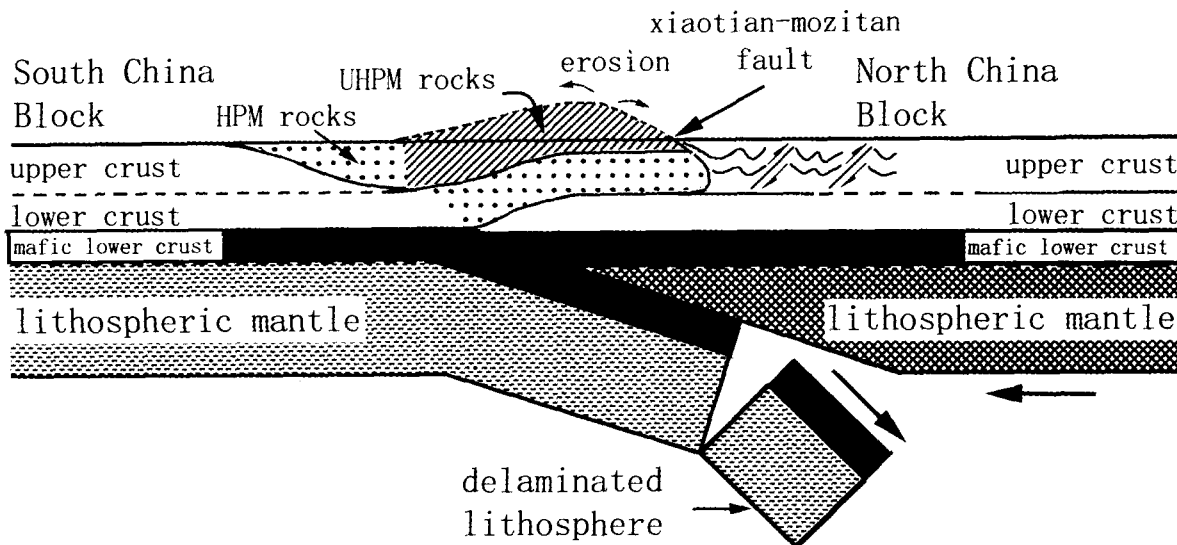


图5 大别山晚碰撞阶段岩石圈楔入模型示意图(据 Li and Yang, 2003)

Fig. 5 Lithospheric wedging model for the late collision stage in Dabie orogen (after Li and Yang, 2003)

尽管上述关于大别山和华中中生代镁铁质岩浆岩同位素组成的类似性有可能存在多种解释,但是大量其它研究均显示在秦岭-大别造山带碰撞晚期华北陆块南缘向南俯冲,而华南陆块北缘向北仰冲的事实。例如,地球物理观测发现在北秦岭的中下地壳发育平行华北地块向秦岭做陆内俯冲并向南倾斜的反射界面(张国伟等,2001)。刘福田等(2003)依据大别造山带深地震宽角反射/折射研究获得的6条二维地壳速度结构剖面显示大别山莫霍面最深(41 Km)并发生错断处位于晓天-磨子潭断裂之下,它指示了深部岩石圈地缝合线的位置。然而近年来大量的年代学研究表明,位于晓天-磨子潭断裂以北的北淮阳庐镇关杂岩是华南陆块北缘未参与大陆俯冲的晚元古代浅变质岩浆岩,因此地表地缝合线应位于庐镇关杂岩以北,相当于信阳-舒城断裂一线(Hacker *et al.*, 1998, 2000; 马文璞等,2001;周建波等,2001;谢智等,2002;Chen *et al.*, 2003; 吴元保等,2004)。因此,地球物理和地表地质证据同样显示大别山仍存在深部地缝合线与地表地缝合线解耦现象,华南陆块中上地壳在北淮阳处向北仰冲覆盖于华北深部岩石圈之上。大别山北部北淮阳带直到中-晚侏罗系才出现的前陆盆地(周进高等,1999)可能就是由于华南陆壳侏罗纪向北仰冲推覆造成的。此外, Lu *et al.* (2004)依据对信阳地区中生代火山岩中的地幔和下地壳包体研究也提出了华北深部岩石圈楔入华南岩石圈的模型。所有这些工作都表明在侏罗纪华北、华南陆块继续汇聚的挤压条件下,华南陆块中上地壳向北仰冲做大别山超高压变质岩第二次快速抬升的构造机制是非常可能的。大别-苏鲁超高压榴辉岩块的边部常发育强面理化榴辉岩,前已述这种面里是超高压岩石第二次快速抬升的构造记录。这些沿面理发育的二次多硅白云母平均 Rb-Sr 年龄(185 ± 2 Ma)指示

了榴辉岩二次快速抬升发生的时代,因而它也指示了这次仰冲构造事件发生的时代。

3.3 早白垩世岩石圈拆离和造山带去根事件及超高压变质岩的第三次快速抬升

最近人们在大别山北部中-晚侏罗世砾岩中发现了榴辉岩砾石,它证明大别山高压或超高压变质岩在中侏罗世已折返出露于地表(Wang *et al.*, 2002)。这说明经过两次快速抬升后,部分超高压变质岩已出露地表。然而目前出露地表尚未被剥蚀的超高压变质岩在中侏罗世时仍具有 300℃ 的温度,并未出露地表。它们出露地表还需要山体进一步抬升和剥蚀。李曙光等(2001b)指出在早白垩世大别山发生了一次岩石圈拆离事件并导致山体快速抬升。然而岩石圈拆离这种很难直接观察的深部构造事件需要更多的证据。山体快速抬升与大规模岩浆事件的耦合是指示岩石圈拆离事件发生的有力证据(Kay and Kay, 1993)。最近,我们对大别山罗田穹隆的惠兰山基型麻粒岩进行了详细的年代学研究。研究表明该麻粒岩是就位于中-下地壳的新元古代镁铁质岩浆岩在早白垩世大别造山带引张条件下因地幔上涌受热发生麻粒岩相变质作用而形成的。该麻粒岩的变质矿物(石榴石+紫苏辉石+单斜辉石)Sm-Nd 等时线年龄为 136 ± 18 Ma(侯振辉等,2005),变质锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 124.0 ± 1.8 Ma(侯振辉,2003 博士论文)。它们对应的麻粒岩相变质温度约为 800℃。该样品的 2 个角闪石给出一致的 Ar-Ar 年龄 119.7 ± 0.5 Ma,对应封闭温度约 500℃。据此,我们可获得罗田穹隆的冷却速率为 $\sim 70^\circ\text{C}/\text{Ma}$ 。其冷却速率可以与超高压变质岩的第一次快速冷却相比较。这一麻粒岩的快速冷却反映了罗田穹隆在早白垩世的一次快速抬升。与

此同时,大别山在早白垩世发生了大规模岩浆事件(如 Hacker *et al.*, 1998; Ma *et al.*, 1998; 李曙光等, 1999; Wei *et al.*, 2001)。这一大规模岩浆事件和山体快速抬升的时代耦合关系证明了其深部发生了岩石圈拆离或山根去根事件,它可能是大别山超高压变质岩被进一步抬升至地表的原因。

4 结论

现今出露大别山地表的超高压变质岩经历了两次快速冷却历史:第一次快速冷却发生在 226Ma ~ 219Ma, 从 800℃ 冷却到 500℃; 第二次快速冷却发生在 185Ma ~ 170Ma, 从 450℃ 冷却到 300℃。这两次快速冷却反映了超高压变质岩经历的两次快速抬升事件

由于大陆岩石圈流变学性质的不均一性,在陆壳俯冲过程中,上下陆壳之间就可发生挤离或脱耦,脱耦的俯冲上地壳可沿挤离面逆冲抬升。由于大陆壳比重较地幔轻,它俯冲进入地幔所产生的浮力随俯冲深度增大而增大。这不断增大的浮力将减缓陆壳俯冲速度,并在与前端俯冲洋壳的下拖力的联合作用下将俯冲板片拉断。俯冲板片的断离并不能使全部俯冲陆壳反弹抬升,它仅使脱耦的俯冲上陆壳在浮力作用下加速抬升折返。下陆壳在板块汇聚动力作用下可继续俯冲。继续俯冲的下陆壳内部还可发生进一步脱耦,使长英质下地壳在浮力作用下抬升折返,而榴辉岩相的镁铁质下地壳继续俯冲直至最后拆离。这是一种大陆岩石圈特有的叠瓦式俯冲过程。

俯冲板片断离后陆块的继续汇聚挤压作用还可导致缝合带两侧岩石圈的相互楔入。在此条件下,大别山华南陆块中-上地壳的向北仰冲是造成超高压变质岩第二次快速抬升的主要机制。

大别山的岩石圈拆离或山根去根事件发生在早白垩世。它导致大别山的大规模岩浆事件及山体快速抬升。与此相伴随,超高压变质岩得到进一步抬升和出露。大别-苏鲁造山带的超高压变质岩正是由于经历了多次快速抬升过程才形成了世界上最大面积出露的超高压变质带。

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1999075503)和国家自然科学基金(批准号:40373009, 40173014)资助。郭敬晖审阅了此文并提供了修改建议,在此表示感谢。

References

Ayers J C, Dunkle S, Gao S *et al.* 2002. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chem Geol*, 186: 315 - 331.

Chemenda A I, Mattauer M, Malavieille J *et al.* 1995. A mechanism for syncollisional rock exhumation and associated normal faulting:

Results from physical modeling. *Earth Planet Sci Lett*, 132: 225 - 232

Chen J F, Xie Z, Li H M *et al.* 2003. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochemical Journal*, 37: 35 - 46

Chopin C. 1984. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps; a first record and some consequences. *Contrib Mineral Petrol*, 86: 107 - 118

Chung S L. 1999. Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the Eastern Plate Boundary between North and South China. *The J. of Geology*, 107: 301 - 312

Davies J H, Vonblanckenburg F. 1995. Slab breakoff - a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 129(1-4): 85 - 102

Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Sci Lett*, 161: 215 - 230

Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L *et al.* 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *J. Geophysical Research*, 105: 13339 - 13364

Hou Z H. 2003. Zirconium geochemistry, trace element characters of zircons and its chronological applications of high-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogen. Ph. D thesis, USTC

Hou Z H, Li S G, Chen N S *et al.* 2005. Sm-Nd and zircon SHRIMP U-Pb dating of Huilanshan mafic granulite in the Dabie mountains and its zircon trace element geochemistry. *Sci China (Ser. D)* (in press)

Kay R W, Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219: 177 - 189

Li Q L. 2003. Thermo-chronology and cooling history of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Dabie-Sulu terrane. Ph. D thesis, USTC

Li Q L, Li S G, Zheng Y F *et al.* 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China: a new constraint on the cooling history. *Chem Geol*, 200: 255 - 265

Li S G, Hong J A, Li H M *et al.* 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite-gabbro intrusions in Dabie mountains and their geological implications. *Geological Journal of China Universities*, 5(3): 351 - 355 (in Chinese with English abstract)

Li S G, Huang F, Li H. 2001. Post-collisional delamination of the lithosphere beneath Dabie-Sulu orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 46(17): 1487 - 1490

Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z *et al.* 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the

Li S G, Sun W D, Zhang Z Q *et al.* 2001. Nd isotope disequilibrium between minerals and Rb-Sr age of the secondary phengite in eclogite from the Yangkou area, Qindao, eastern China. *Chinese Sci Bull*, 46(3): 252 - 255

Li S G, Huang F, Zhou H and Li H. 2003. U - Pb isotopic compositions of the ultrahigh pressure metamorphic (UHPM) rocks from Shuanghe and gneisses from Northern Dabie zone in the Dabie mountains, central China: Constraint on the exhumation mechanism of UHPM rocks. *Science in China (ser. D)*, 46: 200 - 209

Li S G, Yang W. 2003. Decoupling of surface and subsurface sutures in the Dabie orogen and a continental-collisional lithospheric-wedding model: Sr-Nd-Pb isotopic evidences of Mesozoic igneous rocks in eastern China. *Chinese Sci Bull*, 48: 831 - 838.

Li Z X. 1994. Collision between the North and South China Blocks: a crustal detachment model for the suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22: 739 - 742

- Lin J L, Fuller M, Zhang W Y. 1985. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China Blocks. *Nature*, 313: 444 - 449
- Liu F T, Xu P F, Liu J S *et al.* 2003. The crustal velocity structure of the continental deep subduction belt: study on the eastern Dabie orogen by seismic wide-angle reflection/refraction. *Chinese Journal of Geophysics*, 46 (3): 366 - 372 (in Chinese with English abstract)
- Lu F X, Wang C Y, Zheng J P. 2004. Lithospheric composition and structure beneath the northern margin of the Qinling orogenic belt. *Science in China (D)*, 47(1): 13 - 22
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C *et al.* 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China. *Lithos*, 45: 431 - 456
- Ma W P, Wang G Y, Wang G S. 2001. Jinningian plutonic belt in the Fuziling Group and its tectonic implication. *Geol. Rev.*, 47(5): 476 - 481 (in Chinese with English abstract)
- Meissner R, Mooney W. 1998. Weakness of the lower continental crust: a condition for delamination, uplift and escape. *Tectonophysics*, 296: 47 - 60
- Okay A I, Xu S T, Seng r A M C. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogite, Central China. *Eur J Mineral*, 1: 595 - 598
- Smith D C. 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, 310: 641 - 644.
- Soblev N V, Shatsky V S. 1990. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks - a new environment for diamond formation. *Nature*, 343(6260): 742 - 746
- Sun W D, Li S G, Chen Y D *et al.* 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *J. of Geology*, 110: 457 - 468
- Wang D X, Liu Y, Li S G *et al.* 2002. Lower time limit on the UHPM rock exhumation: Discovery of eclogite pebbles in the Late Jurassic conglomerates from the northern foot of the Dabie Mountains, eastern China. *Chinese Sci Bull*, 47(3): 231 - 235
- Wang X M, Liou J G. 1991. Regional ultrahigh-pressure coesite-bearing eclogitic terrane in central China - evidence from country rocks, gneiss, marble, and metapelite. *Geology*, 19(9): 933 - 936
- Wang X M, Liou J G, Mao H K. 1989. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 17: 1085 - 1088
- Wei C J, Zhang L F, Wang S G. 2001. Mesozoic high-K granitic rocks from the eastern Dabie Mountains, Central China and their geological implications. *Sci in China (Ser. D)*, 44(6): 525 - 534
- Wu Y B, Zheng Y F, Gong B *et al.* 2004. Zircon U-Pb ages and oxygen isotope compositions of the Luzhengguan magmatic complex in the Beihuaiyang zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1007 - 1024 (in Chinese with English abstract)
- Xie Z, Chen J F, Zhang X *et al.* 2002. Geochronology of Neoproterozoic mafic intrusions in North Huaiyang area. *Acta Geoscience Sinica*, 23(6): 517 - 520 (in Chinese with English abstract)
- Xu S T, Liu Y C, Su W *et al.* 1999. Geometry, kinematics and tectonic implication of the deformed garnets in the foliated eclogite from the ultra-high pressure metamorphic belt in the Dabie Mountains, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 321 - 337 (in Chinese with English abstract)
- Xu S, Okay A L, Ji S *et al.* 1992. Science, Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80 - 82
- Yang Z Y, Ma X H, Besse J *et al.* 1991. Paleomagnetic results from triassic sections in the ordos basin, north China. *Earth Planet Sci Lett*, 104(2-4): 258 - 277
- Zhang G W, Zhang B R, Yuan X C *et al.* 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Science Press, Beijing, China
- Zhang H F, Gao S, Zhang B R *et al.* 2001. Pb isotopic study on crustal structure of Dabie Mountains, central China. *Geochimica*, 30: 395 - 401 (in Chinese with English abstract)
- Zhou J B, Zheng Y F, Li L, Xie Z. 2001. Accretionary wedge of the subduction of the Yangtze Plate. *Acta Geol. Sinica*, 75(3): 338 - 352 (in Chinese with English abstract)
- Zhou J G, Zhao Z J, Deng H Y. 1999. Tectonic evolution of the Hefei basin and analysis of its petroleum potential. *Acta Geol. Sinica*, 73: 15 - 24 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 侯振辉. 2003. 大别-苏鲁造山带高级变质岩锆的地球化学、锆石微量元素特征及年代学效应. 中国科学技术大学博士学位论文
- 侯振辉, 李曙光, 陈能松等. 2005. 大别造山带惠兰山基性麻粒岩的 Sm-Nd 和锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学及锆石微量元素地球化学. 中国科学 (出版中)
- 李秋立. 2003. 大别-苏鲁超高压的热年代学及冷却史研究. 中国科学技术大学博士学位论文
- 李曙光, 洪吉安, 李慧民等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 高校地质学报, 5(3): 351 - 355
- 李曙光, 黄方, 周红英, 李惠民. 2001a. 大别山双河超高压变质岩及北部片麻岩的同位素组成——对超高压岩石折返机制的制约. 中国科学(D辑), 31(12): 977 - 984
- 李曙光, 黄方, 李晖. 2001b. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. 科学通报, 46(17): 1487 - 1491
- 李曙光, 孙卫东, 张宗清, 李秋立. 2000. 青岛仰口榴辉岩的 Nd 同位素不平衡及二次多硅白云母 Rb-Sr 年龄. 科学通报, 45: 2223 - 2227
- 李曙光, 杨蔚. 2002. 大别造山带深部地缝合线与地表缝合线的解耦及大陆碰撞岩石圈楔入模型: 中生代幔源岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素证据. 科学通报, 47(24): 1898 - 1905
- 刘福田, 徐佩芬, 刘劲松等. 2003. 大陆深俯冲带的地壳速度结构-东大别造山带深地震震角反射/折射研究. 地球物理学报, 46(3): 366 - 372
- 马文璞, 王关玉, 王果胜. 2001. 佛子岭岩群中的晋宁期深成岩带及其构造含义. 地质论评, 47(5): 476 - 482
- 吴元保, 郑永飞, 龚冰等. 2004. 北淮阳庐镇关岩岩锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成. 岩石学报, 20(5): 1007 - 1024
- 谢智, 陈江峰, 张巽等. 2002. 北淮阳新元古代基型侵入岩年代学初步研究. 地球学报, 23(6): 517 - 520
- 徐树桐, 刘贻灿, 苏文等. 1999. 大别山超高压变质带面理化榴辉岩中变形石榴石的几何学和运动学特征及其大地构造意义. 岩石学报, 15(3): 321 - 337
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 科学出版社, 北京.
- 张宏飞, 高山, 张本红等. 2001. 大别山地壳结构的 Pb 同位素地球化学示踪. 地球化学, 30: 395 - 401
- 周建波, 郑永飞, 李龙, 谢智. 2001. 扬子板块俯冲的构造加积楔. 地质学报, 57(3): 338 - 351
- 周进高, 赵宗举, 邓红婴. 1999. 合肥盆地构造演化及含油气性分析. 地质学报, 73: 15 - 24